

# 基于 BP 人工神经网络的长江河口地区土壤盐分动态模拟及预测<sup>①</sup>

余世鹏<sup>1</sup>, 杨劲松<sup>1\*</sup>, 刘广明<sup>1,2</sup>, 邹平<sup>1</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

**摘要:** 为开展长江河口地区土壤盐分动态的中长期模拟与预测, 采用神经网络中应用较为成熟和广泛的 BP 网络建立长江河口地区土壤盐分与降雨量、蒸发量、长江水电导率、内河水电导率、地下水位、地下水电导率因子间的非线性神经网络响应模型。网络模型结构为 6-11-1, 隐含层单元数用“试错法”确定。选择合适的参数训练和学习网络模型后, 对河口地区 2003 年各月平均根层土壤电导率进行预测, 并与线性回归模型预测结果进行比较。结果表明: BP 网络模型较线性回归模型具有更高的预测精度, 平均相对预测误差为 7.3%, 预测值与实测值相关性良好, 可以满足实际应用需求。

**关键词:** BP 人工神经网络; 长江河口; 土壤盐分动态; 预测

**中图分类号:** S156.4

长江河口地区优越的地理位置和自然条件对发展农林牧渔经济十分有利, 但生态环境也较脆弱, 相当一部分地区土壤常受渍渍和盐碱影响<sup>[1]</sup>。特别是近年来长江上游来水量减少导致长江中下游水位屡创历史新低, 上游三峡工程也于 2003 年 6 月开始季节性调蓄运行进而可能带来河口江水位的季节性变化, 这些因素可能影响河口地区咸潮入侵和土壤盐渍化加剧, 不利于农业生产。因此开展河口地区土壤盐分动态的中长期模拟及预测对河口地区土壤盐渍害预报、生态平衡和农业经济发展都具有十分重要的意义。

人工神经网络 (ANN) 是表征多因子非线性关系的一种手段, 在描述和表征自然界大量存在的非线性本质的形态、现象中具有其他学科难以比拟的优势<sup>[2]</sup>。近年来 ANN 在水文、水土工程等学科中的应用越来越广泛。本文采取了人工神经网络中应用较为成熟和有效的 BP (back-propagation) 网络模型对长江河口地区土壤盐分动态进行模拟和预测的初步尝试。

## 1 材料与方法

研究区位于长江入海口北支的江苏省启东市。自

1997 年底开始在长江入海口处布置土壤水盐动态监测点, 开展土壤水盐动态监测工作。各监测点分别在 10、20、40、60、80、120 cm 处安装盐分传感器监测土壤电导率; 各测点地下水位、水质观测井安装深度 185 cm; 分别测定各断面的长江水和内河水电导率。各种数据的监测频率为每 5 天测定一次。收集该地区每天的降雨量和蒸发量数据<sup>[3]</sup>。本研究中数据来自 1997 年 11 月—2003 年 12 月位处长江入海口门处的阳阳 1# 监测点。

采用 Ward Systems Group 公司开发的人工神经网络软件 NeuroShell 2<sup>[3]</sup>, 建立长江河口地区各月份平均根层土壤盐分电导率与月均降雨量、蒸发量、长江水电导率、内河水电导率、地下水位、地下水电导率的 BP 人工神经网络非线性响应模型, 对河口地区各月土壤盐分动态进行模拟预测和评价。

## 2 BP 人工神经网络模型构建

### 2.1 BP 人工神经网络模型简介

Hecht-Nielsen<sup>[4]</sup>指出一个 3 层前馈 ANN 就可满足一般函数的拟合逼近问题。基于 BP 算法的人工神经网络

<sup>①</sup>基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-YW-08-1)、国家“863”计划重点项目 (2007AA091702)、国务院三峡建设委员会办公室重点项目 (SX[2007]-005)、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金项目 (2006412711)、国家自然科学基金项目 (40601100) 和江苏省自然科学基金项目 (BK2006255) 资助。

\* 通讯作者 (jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 余世鹏 (1982—), 男, 浙江淳安人, 博士研究生, 主要从事土壤水盐运移模拟与调控管理及盐渍化预测预报研究。E-mail: spyu@issas.ac.cn

<sup>②</sup>杨劲松. 长江三峡工程生态与环境监测系统河口土壤盐渍化监测重点站 2005 年度监测报告. 中国科学院南京土壤研究所, 2006

删除的内容: 857

带格式的: 行距: 固定值 25 磅

带格式的: 行距: 多倍行距 1.75 字行

带格式的: 行距: 固定值 16 磅

删除的内容: ,

删除的内容:

删除的内容: ,

删除的内容:

删除的内容: ,

删除的内容:

带格式的: 字体: (默认) 仿宋, (中文) 仿宋

带格式的: 行距: 固定值 15 磅

带格式的: 行距: 固定值 18 磅

带格式的 (... [1])

删除的内容: 六

带格式的 (... [2])

带格式的: 列数: 2

带格式的 (... [3])

删除的内容: (1)

删除的内容: B

删除的内容: (... [4])

带格式的 (... [5])

删除的内容: , 结果表且右 (... [6])

删除的内容: 处

带格式的 (... [7])

带格式的: 紧缩量 0.1 磅

删除的内容: (1)

带格式的 (... [8])

带格式的 (... [9])

带格式的 (... [10])

带格式的 (... [11])

带格式的 (... [12])

络模型在水文、土木工程等学科中应用最多的是 3 层拓扑结构网络模型（如图 1 所示），包括输入层、隐含层和输出层。其数学模型为：

$$Y = f(\omega_1 X + \theta_1)$$

$$Z = f(\omega_2 Y + \theta_2)$$

式中， $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分别为输入层、隐含层和输出层矢量（节点向量）， $\omega_1$ 、 $\theta_1$  和  $\omega_2$ 、 $\theta_2$  分别表示输入层与隐含层和隐含层与输出层之间的连接权重和阈值。 $f(x)$  为转移函数，一般采用 Sigmoid logistic 形函数  $f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$  以保证各层神经元的输出是连续的。各节点的输出形式： $y = f(\sum x_i \omega_i - \theta_i)$ ,  $i = 1, \dots, n^{[3]}$ 。

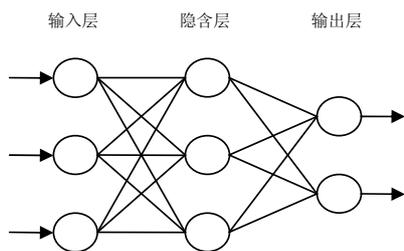


图 1 3 层 BP 神经网络拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of the three-layer BP artificial neural network

### 2.2 模型建立和参数选取

该 BP 神经网络模型的输入样本为长江河口

地区位处长江入海口门处寅阳 1# 监测点每个月的平均降雨量、蒸发量、地下水位、地下水电导率、长江水电导率和内河水电导率 6 个因子，输出样本为该层土壤根层（40 cm 层）的月均土壤电导率值。隐含层和输出层的转移函数形式均为 Sigmoid logistic 形函数  $f(x_i) = (1 + e^{-S})^{-1}$ ,  $S = (x_i - x') / sd$ ,  $x_i$  为原始数据， $x'$  为原始数据的均值， $sd$  为原始数据的标准差。各层的学习速率  $\eta = 0.1$ ；调整系数  $u = 0.1$ ，以防止振荡盒学习速率过小；初始权重设置为 0.3。

BP 神经网络模型收敛准则的选择，要求每个样本的教学值与网络输出值的绝对误差（拟合误差）小于给定的足够小量  $\epsilon$ ，称为训练精度。一般， $\epsilon$  越小拟合精度越高，但是  $\epsilon$  太小会极大增加训练时间，而且拟合误差减小到某值后学习预测误差反而增大，泛化能力降低<sup>[5]</sup>。本研究选择平均训练拟合误差  $< 0.002$  为标准，以保证最后的平均学习预测误差在 0.03 以内。

网络模型隐含层单元数的确定，采用目前较为有效的“试错法”（Trial-and-Error）<sup>[6]</sup>。首先给定较小初始隐含层单元数构成一个结构较小的 BP 网络进行训练，逐渐增加隐含层单元数进行训练，比较每种隐含层单元数训练下模型达到收敛所需的训练次数和最后平均学习预测误差（表 1）。本研究选择平均训练拟合误差达到  $< 0.002$  所需训练次数最少的 11 个隐含层单元数，此训练下的平均学习预测误差为 0.030。

表 1 BP 网络模型不同隐含层单元数下的训练次数与平均预测误差

Table 1 Training times and average prediction errors of the BP network model using different cells number in the hidden layer

隐含层单元数	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
训练次数	5389	4420	5661	3940	3940	3301	5064	3940	4302	5064	4885
平均预测误差	0.026	0.033	0.028	0.029	0.030	0.030	0.030	0.029	0.027	0.029	0.025

### 3 模型训练、检验与评价

#### 3.1 模型训练和学习

该 BP 网络模型的训练和学习样本为 1997 年 11 月—2002 年 12 月各月的平均降雨量、蒸发量、长江水电导率、内河水电导率、地下水位、地下水电导率和土壤 40 cm 层电导率，共计 62 组训练和学习样本，其中训练样本占 75%，学习预测样本占 25%。该 BP 网络模型训练 3301 次后平均误差达到  $< 0.002$  的标准，最终的平均学习预测误差为 0.030。最终所得的各层的权重、阈值见表 2。其中， $W_1$ 、 $b_1$  和  $W_2$ 、 $b_2$  分别为输入层与隐含层间和隐含层与输出层间的连接权重值、阈值。

#### 3.2 模型检验

该模型的检验样本为 2003 年 1—12 月份的月平均降雨量、蒸发量、长江水电导率、内河水电导率、地下水位、地下水电导率和土壤 40 cm 层电导率，共计 12 组样本。将 2003 年各月的 6 个输入因子输入以上已建立的 BP 神经网络模型进行模型预测，预测所得的各月平均根层土壤电导率值与实测值对比情况见表 3。

表 3 对比结果表明运用本研究所得 BP 神经网络模型模拟预测 2003 年河口地区各月根层土壤电导率最大相对误差为 17.5%，平均相对误差为 7.3%。由以上模型模拟预测所得值与实际土壤盐分含量值线性回归（图 2），相关系数  $r = 0.78$ ，模拟预测值与实测值相关性良好。

- 带格式的：页眉，两端对齐
- 删除的内容：:
- 带格式的：缩进：首行缩进：0 磅
- 带格式的：字体：非倾斜
- 带格式的：段落间距段前：6 磅
- 带格式的：段落间距段前：6 磅
- 带格式的：段落间距段前：6 磅
- 带格式的：字体：黑体
- 带格式的：字体：(国际)黑体
- 带格式的：字体：黑体
- 带格式的：居中
- 删除的内容： (
- 带格式的：节的起始位置：连续
- 带格式的：... [13]
- 带格式的：字体：黑体
- 带格式的：... [14]
- 带格式的：列数：2
- 删除的内容：隐含层单元数
- 带格式的：... [15]
- 带格式的：... [16]
- 带格式表格
- 带格式的：... [17]
- 带格式的：... [18]
- 带格式的：... [19]
- 带格式的：... [20]
- 带格式的：... [21]
- 带格式的：... [22]
- 删除的内容：: ... [23]
- 带格式的：... [24]
- 带格式的：紧缩量 0.1 磅
- 带格式的：... [25]
- 带格式的：... [26]
- 删除的内容：:
- 带格式的：... [27]
- 带格式的：... [28]
- 带格式的：... [29]
- 带格式的：... [30]

表 2 BP 网络模型训练学习结果各层的权重、阈值

Table 2 Weight values and bias values between layers of the BP network model after training and testing

	$W_1$			$b_1$			$W_2$		
	0.778	-1.507	-0.188	0.771	0.201	-0.592	0.768	1.871	0.771
	1.716	-1.582	-1.994	-0.990	1.721	-3.589	-1.420	-3.841	
	0.141	-1.032	-0.513	0.582	0.632	-0.032	0.467	1.482	
	-0.549	0.031	1.443	-0.899	-0.718	-0.239	0.052	-1.717	
	-1.924	-0.197	0.902	0.155	-1.895	7.803	-2.715	5.592	
	-0.160	-0.148	-0.327	-0.216	0.022	-0.076	0.253	0.254	
	0.124	-0.203	-0.650	0.589	0.298	-0.001	0.236	1.034	
	-1.118	-0.191	2.741	2.775	1.457	2.948	0.873	-3.952	
	-0.366	-0.118	0.558	-0.306	-0.752	-0.081	0.301	-0.771	
	0.243	0.836	0.999	1.150	-0.071	2.665	-0.946	-2.221	
	0.547	0.042	1.043	1.594	1.000	3.369	-1.082	-3.734	

表 3 预测值与实测值对比情况

Table 3 Comparison of the predicted values and the actual values

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
预测值 (mS/cm)	4.356	4.465	4.277	3.653	3.715	3.534	3.067	3.401	3.461	3.911	3.935	4.143
实测值 (mS/cm)	5.067	4.492	4.294	3.524	3.524	3.749	2.866	3.321	4.091	4.743	4.086	3.690
相对误差 (%)	14.0	0.6	0.4	3.7	5.4	5.7	7.0	2.4	15.4	17.5	3.7	12.3

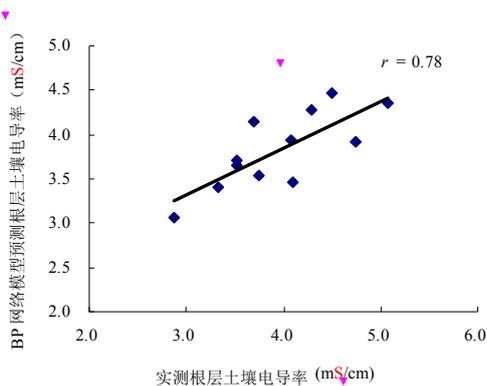


图 2 BP 网络模型预测土壤电导率值与实测值的相关性

Fig. 2 Correlativity between the predicted soil EC by BP network model and the actual soil EC

### 3.3 模型评价

为了进一步比较和评价 BP 神经网络模型的预测精度,采用多元线性回归模型对 1997 年 11 月—2002 年 12 月河口地区土壤盐分与其余 6 因子进行线性拟合,拟合所得回归模型方程:

$$y = 0.001x_1 - 0.015x_2 - 0.162x_3 + 0.236x_4 - 0.018x_5 + 0.576x_6 + 8.888$$

式中,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 、 $x_6$  分别为降雨量、蒸发量、长江水电导率、内河水电导率、地下水位和地下水电导率,  $y$  为 40 cm 层土壤电导率。利用所得的拟合回归模型对 2003 年 1—12 月河口地区土壤盐分动态进行预测,所得的土壤电导率预测结果与 BP 神经网络模型的预测结果进行比较(表 4)。

表 4 BP 网络模型与线性回归模型预测误差比较

Table 4 Comparison of the prediction error from the BP network model and the linear regression model

项目	BP 网络模型	线性回归模型
平均相对预测误差 (%)	7.3	21.1
最大相对预测误差 (%)	17.5	63.3

分析结果表明 BP 神经网络模型的平均相对预测误差和最大相对预测误差比线性回归模型的平均相对预测误差和最大相对预测误差要小很多, BP 神经网络模型对河口地区土壤盐分动态的模拟与预测具有更高的精度。考虑到影响河口地区土壤盐分动态因素的复杂性、变化性和田间长期监测的操作因素等,部分月份土壤盐分动态的 BP 神经网络模拟预测值与实测值略有一定出入,但就其整体而言,该模型的模拟预测精度完全可以满足实际应用需求。

带格式的: 节的起始位置: 连续

删除的内容:

删除的内容:

删除的内容: 3.2 模型检验

该模型的检验样本为 ... [31]

删除的内容: s

删除的内容: (ms/cm)

带格式的: 列数: 2

带格式的 ... [32]

删除的内容: <sp>表 2 对比 ... [33]

带格式的: 行距: 固定值 5 磅

删除的内容: s

带格式的: 行距: 固定值 12 磅

带格式的: 字体: Times New Roman

带格式的: 字体: Times New Roman

带格式的 ... [34]

带格式的 ... [35]

带格式的: 居中, 行距: 固定值 14 磅

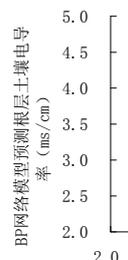
删除的内容: □

带格式的: 行距: 固定值 14 磅

带格式表格

带格式的: 居中, 行距: 固定值 11 磅

带格式的: 行距: 固定值 14 磅



删除的内容: ... [36]

带格式的: 居中

带格式的: 行距: 固定值 14 磅

带格式的: 行距: 固定值 12 磅

删除的内容:

### 4 结论

本研究根据神经网络的基本原理，用研究应用较成熟的 BP-ANN 对长江河口地区土壤盐分动态进行了模拟和预测，建立了每个月份平均根层土壤盐分电导率与月均降雨量、蒸发量、长江水电导率、内河水电导率、地下水位、地下水电导率的响应模型。该模型为 6-11-1 结构，隐含层单元数目用“试错法”确定；隐含层和输出层转移函数为 Sigmoid logistic 形函数；各层的学习速率  $\eta = 0.1$ ，调整系数  $u = 0.1$ ，初始权重 0.3；平均训练拟合误差设定  $< 0.002$  为准，以保证最后平均学习预测误差在 0.03 以内。

应用建立的 BP-ANN 模型对河口地区 2003 年各月根层土壤盐分动态进行模拟预测，与实测值的最大相对误差 17.5%、平均相对误差 7.3%，预测值与实测值相关系数  $r = 0.78$  呈极显著相关，模型具有较高预测精度，可以满足实际应用需求。通过该模型预测结果与线性回归模型预测结果的比较，表明 BP 神经网络模型具有更高的预测精度。

本文用 BP 神经网络模型对土壤盐分动态的中长期预报进行了探讨，为土壤盐渍害监测预报工作提供了一个新的可行途径。但是 BP 神经网络模型的应用条件有一定的局限性<sup>[7]</sup>，它特有的“黑箱”式构建过程无法直观定量不同因素与目标值之间的依赖关

系<sup>[8]</sup>，因此需要进行更为广泛深入的研究探讨。

### 参考文献：

- [1] 江苏省土壤普查办公室. 江苏土壤. 北京: 中国农业出版社, 1995
- [2] 王献昌. 人工智能的研究趋向多元化—参加第十三届国际人工智能联合大会总结. 计算机科学, 1994, 21(1): 1-5
- [3] 韩力群. 神经网络理论、设计及应用. 北京: 化学工业出版社, 2002
- [4] Hecht-Nielsen R. Komogrov's mapping neural network existence theorem. Proceedings of the International Conference on Neural Networks. New York: IEEE Press, 1987(3): 11-13
- [5] 刘国东, 丁晶. BP 网络用于水文预测的几个问题探讨. 水利学报, 1999(1): 65-70
- [6] Raman H, Sunilkumar N. Multivariate modeling of water resources time series artificial neural networks. Hydrological Sciences Journal, 1995, 40(2): 145-163
- [7] 张立明. 神经网络的模型及其应用. 上海: 复旦大学出版社, 1993
- [8] 杨娟, 王昌全, 李冰, 李焕秀, 何鑫. 基于 BP 神经网络的城市边缘带土壤重金属污染预测—以成都平原土壤 Cd 为例. 土壤学报, 2007, 44(3): 430-436

## Simulation and Prediction of Soil Salt Dynamics in the Yangtze River Estuary with BP Artificial Neural Network

YU Shi-peng<sup>1</sup>, YANG Jin-song<sup>1</sup>, LIU Guang-ming<sup>1,2</sup>, ZOU Ping<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to conduct a medium-long term simulation and prediction of the soil salt dynamics in the Yangtze River estuary, a nonlinear artificial neural network response-model among 6 factors of soil salt, rainfall, evaporation, river water EC, freshwater EC, water table and groundwater EC was established with the BP network which has been applied maturely and widely in all kinds of artificial neural networks. The structure of the network model was fixed on 6-11-1. The cells number of the hidden layer was confirmed using the Trial-and-Error method. After the network model was trained and tested by choosing appropriate parameters, it was applied to predict the average root-layer soil EC in the Yangtze River estuary in every month of 2003. The predicted result from the network model was compared with that from the linear regression model. Results showed that the BP network model had higher precision in predicting the salt dynamics than the linear regression model. The average relative error was 7.3% and the correlativity between predicted value and actual value was all right, both of which showed that the simulation and prediction of the BP artificial neural network could meet the need of the practical application.

**Key words:** Back-propagation artificial neural network, Yangtze River estuary, Soil salt dynamics, Prediction

带格式的：页眉，两端对齐

删除的内容：

删除的内容：

带格式的：行距：固定值 15.5 磅

带格式的：行距：固定值 15 磅

带格式的：行距：固定值 15 磅，无项目符号或编号

带格式的：节的起始位置：连续

带格式的：行距：固定值 15 磅

删除的内容：

删除的内容：

删除的内容：

页 857: [1] 带格式的	xuxiaoyu	2008-11-15 9:36:00
-----------------	----------	--------------------

行距: 固定值 15 磅

页 857: [2] 带格式的	xuxiaoyu	2008-12-09 20:03:00
-----------------	----------	---------------------

行距: 固定值 18 磅

页 857: [3] 带格式的	xuxiaoyu	2008-11-15 9:35:00
-----------------	----------	--------------------

缩进: 首行缩进: 0 字符

页 857: [4] 删除的内容	xuxiaoyu	2008-11-15 9:34:00
------------------	----------	--------------------

①基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-YW-08-1)、国家“863”计划重点项目 (2007AA091702)、国务院三峡建设委员会办公室重点项目 (SX[2007]-005)、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金项目 (2006412711)、国家自然科学基金项目 (40601100) 和江苏省自然科学基金项目 (BK2006255) 资助。

\* 通讯作者 (jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 余世鹏 (1982—), 男, 浙江淳安人, 博士研究生, 主要从事土壤水盐运移模拟与调控管理及盐渍化预测预报研究。E-mail: spyu@issas.ac.cn

(1) 杨劲松. 长江三峡工程生态与环境监测系统河口土壤盐渍化监测重点站 2005 年度监测报告. 中国科学院南京土壤研究所,

页 857: [5] 带格式的	xuxiaoyu	2008-11-15 9:34:00
-----------------	----------	--------------------

行距: 固定值 8 磅

页 857: [6] 删除的内容	xuxiaoyu	2008-11-30 20:29:00
------------------	----------	---------------------

, 结果表明具有较好的模拟和预测精度

页 857: [7] 带格式的	xuxiaoyu	2008-11-30 20:30:00
-----------------	----------	---------------------

字体: (默认) Times New Roman

页 857: [8] 带格式的	xuxiaoyu	2008-12-09 20:04:00
-----------------	----------	---------------------

缩进: 左侧: 0 磅

页 857: [9] 带格式的	xuxiaoyu	2008-11-30 20:30:00
-----------------	----------	---------------------

字体: (默认) Times New Roman

页 857: [10] 带格式的	xuxiaoyu	2008-11-30 20:30:00
------------------	----------	---------------------

字体: (默认) Times New Roman

页 857: [11] 带格式的	xuxiaoyu	2008-11-30 20:30:00
------------------	----------	---------------------

字体: (默认) Times New Roman

页 857: [12] 带格式的	xuxiaoyu	2008-11-30 20:30:00
------------------	----------	---------------------

字体: (默认) Times New Roman

页 977: [13] 带格式的	xuxiaoyu	2008-12-06 16:24:00
------------------	----------	---------------------

行距: 固定值 14 磅

页 977: [14] 带格式的 xuxiaoyu 2008-12-06 16:24:00

行距: 固定值 14 磅

页 977: [15] 删除的内容 xuxiaoyu 2008-11-15 9:39:00

隐含层单元数	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
训练次数	5389	4420	5661	3940	3940	3301	5064	3940	4302	5064	4885
平均预测误差	0.026	0.033	0.028	0.029	0.030	0.030	0.030	0.029	0.027	0.029	0.025

页 977: [16] 带格式的 xuxiaoyu 2008-11-15 9:39:00

行距: 固定值 3 磅

页 977: [17] 带格式的 xuxiaoyu 2008-11-15 9:39:00

行距: 固定值 3 磅

页 977: [18] 带格式的 xuxiaoyu 2008-11-15 9:39:00

行距: 固定值 3 磅

页 977: [19] 带格式的 xuxiaoyu 2008-11-15 9:39:00

行距: 固定值 3 磅

页 977: [20] 带格式的 xuxiaoyu 2008-11-15 9:39:00

行距: 固定值 3 磅

页 977: [21] 带格式的 xuxiaoyu 2008-11-15 9:39:00

行距: 固定值 3 磅

页 977: [22] 带格式的 xuxiaoyu 2008-11-15 9:39:00

行距: 固定值 3 磅

页 977: [23] 删除的内容 xuxiaoyu 2008-11-15 9:33:00

页 977: [24] 带格式的 xuxiaoyu 2008-12-06 16:23:00

段落间距段前: 6 磅, 行距: 固定值 14 磅

页 977: [25] 带格式的 xuxiaoyu 2008-12-06 22:00:00

缩进: 首行缩进: 19.5 磅

页 977: [26] 带格式的 xuxiaoyu 2008-12-06 16:23:00

行距: 固定值 15.75 磅

页 977: [27] 带格式的 xuxiaoyu 2008-12-06 22:00:00

缩进: 首行缩进: 20.25 磅, 行距: 固定值 15.75 磅

页 977: [28] 带格式的 xuxiaoyu 2008-12-06 22:00:00

行距: 固定值 15.3 磅

页 977: [29] 带格式的 xuxiaoyu 2008-11-15 12:16:00

缩进: 首行缩进: 21.85 磅, 行距: 固定值 2 磅

页 977: [30] 带格式的 xuxiaoyu 2008-11-15 9:42:00

行距: 固定值 2 磅

页 978: [31] 删除的内容 xuxiaoyu 2008-11-15 9:40:00

### 3.2 模型检验

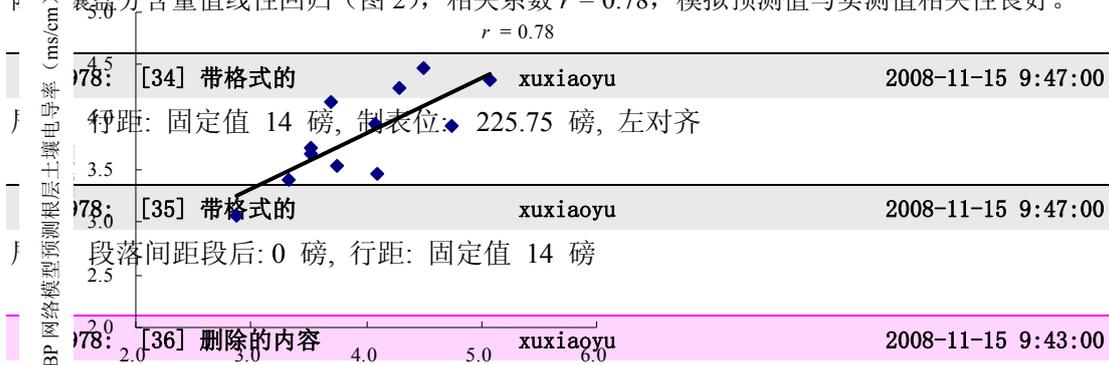
该模型的检验样本为 2003 年 1—12 月份的月平均降雨量、蒸发量、长江水电导率、内河水电导率、地下水位、地下水电导率和土壤 40 cm 层电导率, 共计 12 组样本。将 2003 年各月的 6 个输入因子输入以上已建立的 BP 人工神经网络模型进行模型预测, 预测所得的各月平均根层土壤电导率值与实测值对比情况见表 3。

页 978: [32] 带格式的 xuxiaoyu 2008-11-15 9:50:00

缩进: 首行缩进: 21.85 磅, 行距: 固定值 13 磅

页 978: [33] 删除的内容 xuxiaoyu 2008-11-15 9:49:00

表 3 对比结果表明运用本研究所得 BP 人工神经网络模型模拟预测 2003 年涪陵地区各县根层土壤电导率值线性回归 (图 2), 相关系数  $r = 0.78$ , 模拟预测值与实测值相关性良好。



页 978: [34] 带格式的 xuxiaoyu 2008-11-15 9:47:00

行距: 固定值 14 磅, 制表位: 225.75 磅, 左对齐

页 978: [35] 带格式的 xuxiaoyu 2008-11-15 9:47:00

段落间距段后: 0 磅, 行距: 固定值 14 磅

页 978: [36] 删除的内容 xuxiaoyu 2008-11-15 9:43:00

实测根层土壤电导率 (ms/cm)

